

DE 198 52 320 (import anmeldung)
→ was not published (PCT) 1837
Verfahren zum Messen elektromagnetischer Strahlung

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen elektromagnetischer Strahlung, die von einer Oberfläche eines Gegenstands abgestrahlt wird, der durch elektromagnetische, von wenigstens einer Strahlungsquelle abgegebenen elektromagnetischen Strahlung bestrahlt wird, wobei die von der Strahlungsquelle abgegebene Strahlung mit wenigstens einem ersten Strahlungsdetektor und die vom be-

10 strahlten Gegenstand abgegebene Strahlung mit wenigstens einem zweiten, die Strahlungsdetektor messenden Detektor ermittelt wird.

Ein Verfahren dieser Art ist beispielsweise aus der

15 US-5 490 728 A im Zusammenhang mit der Fertigung von Halbleitersubstraten in einer Reaktionskammer bekannt. Die von der Strahlungsquelle abgegebene elektromagnetische Strahlung ist dabei naturgemäß mit einer Welligkeit überlagert, die durch Schwankungen der Netzspannung oder

20 auf Grund von Phasen-Anschnittssteuerungen ungewollt auftreten. Auf diese Welligkeit kann jedoch kein Einfluß genommen werden, und sie kann auch nicht bewußt gewählt werden. Sie ist daher für eine bewußte Ausnutzung als Charakteristik der von der Strahlungsquelle abgegebenen

25 Strahlung - wenn überhaupt - nur bedingt tauglich.

Ferner sei auf die DE-A-26 27 753 verwiesen, welche eine Vorrichtung zur Dickenmessung und -steuerung optisch wirksamer Dünnschichten während ihres Aufbaus in Vakuum-

30 beschichtungsanlagen zeigt. Die Messung und Steuerung wird erreicht durch Erfassen des Reflexions bzw. Transmissionsverhaltens von Schichtdicken zwischen Bruchteilen und einigen Vielfachen der Wellenlänge des verwendeten,

im wesentlichen monochromatischen Meßlichts und durch Unterbrechung des Beschichtungsvorgangs bei Erreichen einer vorbestimmten Schichtdicke. Die Vorrichtung besteht aus einer Meßlichtquelle für einen fokussierten Meßlicht-

5 strahl, eine Zerhackervorrichtung, einen in der Achse des Meßlichtstrahls unter einem Winkel von 45° angeordneten Strahlenteiler, einem Meßlichtempfänger mit vorgeschaltetem Monochromator, sowie aus einer Differenziereinrichtung für das Meßsignal und einer Unterbrechungseinrichtung für den Beschichtungsvorgang. Darüber hinaus ist in

10 der DE-A-42 24 435 ein optisches Interface für die Infrarotüberwachung von Klarsichtscheiben beschrieben, bei dem das Licht einer Infrarotstrahlungsquelle durch Lichtwellenleiter ins Innere des Interface geleitet und dort zum

15 Belichten der Scheibenoberfläche ausgestrahlt wird. Die an der zu überwachenden Scheibe reflektierte Strahlung wird durch den Eingang eines anderen Lichtwellenleiters aufgenommen und durch den Lichtwellenleiter über einen Tageslichtfilter auf einen Photodetektor geleitet. Weiterhin zeigt die US-A-5 270 222 ein Verfahren und eine

20 Vorrichtung für eine Diagnose und Prognose bei der Herstellung von Halbleitervorrichtungen. Die Vorrichtung weist einen Sensor für die Diagnose und Prognose auf, der unterschiedliche optische Eigenschaften eines Halbleiterwafers mißt. Der Sensor weist einen Sensorarm und einen

25 optoelektronische Steuerbox auf, zum Leiten kohärenter elektromagnetischer oder optischer Energie in Richtung des Halbleiterwafers.

30 Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art zu schaffen, mit dem die Messung elektromagnetischer Strahlung und die Ermitt-

lung der daraus abgeleiteten Parameter und Werte auf einfache Weise noch genauer durchgeführt werden kann.

- Die gestellte Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die von wenigstens einer Strahlungsquelle abgegebene Strahlung mit wenigstens einem charakteristischen Parameter aktiv moduliert wird, und daß die vom zweiten ~~Strahlungs~~ Detektor ermittelte Strahlung zur Kompensation der vom Gegenstand reflektierten Strahlung der Strahlungsquelle durch die vom ersten ~~Strahlungs~~ Detektor ermittelte Strahlung korrigiert wird. Die Strahlungsquelle ist vorzugsweise eine Heizlampe und der bestrahlte Gegenstand ist vorzugsweise ein Halbleitersubstrat, das einer thermischen Behandlung unterzogen wird.
- Auf Grund der bewußten, aktiven und dadurch bekannten Modulation der Strahlungsquelle mit einem charakteristischen Parameter ist es möglich, die Unterscheidung zwischen der vom Gegenstand selbst abgestrahlten Strahlung, die für die Ermittlung der Eigenschaften des Gegenstands erforderlich ist, noch genauer von der vom Gegenstand reflektierten Strahlung der Strahlungsquelle zu unterscheiden. Auf diese Weise ist es möglich, die Eigenschaften des Gegenstands, beispielsweise die Temperatur, die Emissivität, die Transmissivität, die Reflektivität oder die Schichtdicken oder -eigenschaften eines vom Material des Gegenstands unterschiedlichen Materials auf dem Gegenstand noch genauer und in Realzeit zu bestimmen.
- Gemäß einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird die aktive Modulation der von der Strahlungsquelle abgegebenen Strahlung zu deren Charakterisierung bei der Korrektur der vom zweiten ~~Strahlungs~~ De-

tektor ermittelten Strahlung herangezogen. Durch die aktive und damit bekannte Modulation der von der Strahlungsquelle abgegebenen Strahlung ist die Charakterisierung und damit Unterscheidung dieser Strahlung von der
5 eigentlich zu messenden Strahlung, die vom Gegenstand abgegeben wird, besonders einfach, zuverlässig und quantitativ genau.

Die von der Strahlungsquelle abgegebene Strahlung ist
10 vorzugsweise amplituden-, frequenz- und/oder phasenmoduliert. Je nach den vorhandenen Gegebenheiten und Erfordernissen ist die Wahl der Modulationsart wählbar, wobei die Modulationsart insbesondere auch im Hinblick auf die Einfachheit und Zuverlässigkeit des Modulations-
15 verfahrens, aber auch des Auswerteverfahrens und des Detektionsverfahrens auswählbar ist. Dabei ist unter Amplitudenmodulation die Modulation der Modulationsamplitude zu verstehen. Bevorzugt wird jedoch mit Intensitätsmodulation gearbeitet, deren Amplitude nicht moduliert wird,
20 sondern eventuell langsam variiert.

Neben der Modultionsart ist es auch möglich, jede Signalform der Modulation einzusetzen. Besonders vorteilhaft ist es jedoch, daß bei einer Amplitudenmodulation eine
25 Signalform mit möglichst stetigem Signalverlauf verwendet wird. Dies hat den Vorteil, daß auch bei einer Fourier-Transformation hohe Frequenzen im wesentlichen nicht auftreten und daher auch die Zahl der Abtastungen pro Zeiteinheit bei der Detektion bzw. Verarbeitung des detek-
30 tierten Signals gering bleiben kann, so daß mit einem einfachen Auswerteverfahren dennoch eine gute und genaue Messung durchführbar ist.

Allgemein kann die Modulation des charakteristischen Parameters mit einem periodischen oder nichtperiodischen Signal erfolgen. Eine nichtperiodische Modulation läßt sich z. B. dadurch erhalten, daß der charakteristische Parameter mit einem positiven oder negativen Inkrement, das mittels eines Zufallsmechanismus erzeugt wird, über eine Verknüpfungsoperation (z. B. Addition, Multiplikation oder einer Verknüpfung mit einer Look-up-Tabelle) verknüpft wird. Dabei wird das Inkrement nach Ablauf eines Zeitintervalls jeweils neu nach einem Zufallsprinzip bestimmt. Das Zeitintervall selbst kann dabei konstant, nach einer vordefinierten Funktion oder wiederum nach einem Zufallsprinzip bestimmt werden. Wichtig bei der nichtperiodischen Modulation ist, daß die durch Zufallsprinzipien bestimmten Parameter (Inkrement und/oder Zeitintervall) bekannt und innerhalb einer Auswertevorrichtung oder eines Auswerteverfahrens zur Signalanalyse zu Verfügung stehen. Die durch ein Zufallsprinzip bestimmten Parameter (Inkrement und/oder Zeitintervall) können einer beliebig vordefinierten Verteilungsfunktion genügen. Sie können z. B. gleich-, gauß- oder poissonverteilt sein, wodurch die jeweiligen Erwartungswerte der Parameter ebenfalls vordefiniert sind. Der Vorteil einer nichtperiodischen Modulation liegt darin, daß dadurch periodische Störeinflüsse unterdrückt werden können.

Eine weitere vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung besteht darin, daß die Strahlungsquelle aus mehreren Einzel-Strahlungsquellen, beispielsweise aus mehreren Lampen besteht, die zu einer oder mehreren Lampenbänken zusammenfaßbar sind. Gemäß vorteilhaften Ausführungsformen im Zusammenhang mit aus mehreren Lampen bestehenden Strahlungsquellen ist wenigstens eine der Lampen in ihrer

Strahlung moduliert. An sich kann die Modulation der Strahlung einer Lampe zur Erzielung der Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens ausreichen, obgleich die Modulation von nur einer Lampe nur unter Einschränkungen an die Universalität des Meßverfahrens überhaupt ein sinnvolles Ergebnis liefert. Eine besonders einfache Ansteuerung der Lampen mit einem einzigen Leistungsschalter ist insbesondere auch dann gegeben, wenn wenigstens zwei Lampen oder alle Lampen hinsichtlich ihrer Strahlung in der gleichen Weise moduliert werden. Vorteilhaft ist die Modulation der Strahlung von nur einer oder einigen Lampen, um unerwünschte Reflexionen zu vermeiden.

Je nach den Anwendungsfällen und Gegebenheiten ist es jedoch auch vorteilhaft, die Strahlung der Lampen unterschiedlich zu modulieren, beispielsweise dann, wenn die Lampenstrahlung in Abhängigkeit von der Lage der Lampen oder von der jeweils spezifischen Lampe gegenüber der Strahlung anderer Lampen oder gegenüber anderen Lampen unterschieden werden soll.

Die Strahlenmodulation der einzelnen Lampen oder Strahlungsquellen ist vorzugsweise für wenigstens einige von ihnen zeitlich synchron oder in einer festen zeitlichen Zuordnung zueinander vorgesehen, obgleich in bestimmten Anwendungsfällen auch zeitlich nicht synchrone Strahlenmodulationen vorteilhaft sein können.

Gemäß einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist der Modulationsgrad und insbesondere die Modulationstiefe der von der Strahlungsquelle abgegebenen Strahlung, - gegebenenfalls auch von Strahlungsquelle zu Strahlungsquelle unterschiedlich -, von der abgestrahlten

Lampenintensität unabhängig. Diese sogenannte Absolut-Modulation ist also unabhängig vom Grundpegel oder Gleichstromsignal, mit dem die Strahlungsquelle oder Lampe angesteuert wird. Diese Ausführungsform der Erfindung weist
5 den Vorteil auf, daß während des Anstiegs der Intensität der Strahlenquelle, der gegebenenfalls schnell vorgenommen werden soll, die volle Ansteuerung ausgenutzt werden kann und nicht durch eine zu große Modulation in ihrer Intensität eingeschränkt ist.

10

In anders gelagerten Anwendungsfällen ist jedoch die Ausführungsform der Erfindung vorteilhafter, bei der der Modulationsgrad bzw. die Modulationstiefe von der abgestrahlten Intensität der Strahlungsquelle abhängig ist.

15

Diese sogenannte Relativ-Modulation, bei der beispielsweise die Stärke des Wechselstrom-Ansteuersignals von der Stärke des Gleichstrom-Ansteuersignals der Strahlungsquelle abhängt oder ihr proportional ist, hat den Vorteil, daß der relative Modulationsgrad konstant ist oder
20 sich nur in geringerem Maße ändert, wodurch die Detektion der Modulation und die Auswertung einfacher und mit weniger aufwendigen Geräten durchführbar ist.

25

Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung wird der Modulationsgrad oder die Modulationstiefe gesteuert oder auch aktiv geregelt.

30

Gemäß einer weiteren sehr vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist Lampenintensität und/oder die Modulation selbst pulsweiten-moduliert. Gemäß einer alternativen oder zusätzlichen Ausführungsform der Erfindung wird die Strahlung der Strahlungsquelle durch Verwendung von Tabellenwerten mit einem Datenverarbeitungsprogramm modu-

liert. Eine weitere sehr vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung besteht auch darin, die Strahlung durch Ändern der Zählerfrequenz von Generatoren für die Pulsweiten-Modulation zu modulieren.

5

Die Lampenleistung wird durch Pulsweiten-Modulation verändert. Die Strahlungsintensität ist dabei eine Funktion der Wendeltemperatur, die jedoch im stationären, eingeschwungenen Zustand direkt mit der Lampenleistungen korrespondiert.

10

Die Strahlung der Strahlungsquelle wird vorzugsweise durch eine Modulation des Ansteuersignals bzw. der Ansteuersignale für die Strahlungsquelle bzw. die Lampen moduliert. Wie im weiteren im einzelnen noch ausgeführt werden wird, ist die Stelle, an der das Ansteuersignal innerhalb der Signalerzeugung moduliert wird, je nach den Erfordernissen und Gegebenheiten wählbar. Besonders vorteilhaft ist es dabei, wenn das Ansteuersignal nach dessen Erzeugung unmittelbar vor Zuführung zu der Strahlungsquelle oder den Lampen moduliert wird.

15

20

25

Die vorliegende Erfindung ist mit großem Vorteil zur Bestimmung der Temperatur, Reflektivität und/oder Emissivität eines Gegenstands anwendbar, beispielsweise im Zusammenhang mit einer Vorrichtung zur thermischen Behandlung von Substraten etwa in einem Ofen, in dem die Substrate schnell und mit einem möglichst genauen, vorgegebenen Temperaturverlauf aufgeheizt und abgekühlt werden.

30

Gemäß der Erfindung wird also die von wenigstens einer Strahlungsquelle, beispielsweise eine Heizlampe abgegebene Strahlung und die vom aufzuheizenden Gegenstand her-

rührende Strahlung ~~gemessen~~ ermittelt, wobei sich letztere aus der von dem Gegenstand emittierten Strahlung und der am Gegenstand reflektierten Strahlung zusammensetzt. Durch die beiden Messungen ist es möglich, die vom Gegenstand reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen heraus zu korrigieren und damit die emittierte Strahlung, also die Wärmestrahlung des Gegenstands zu bestimmen, der normalerweise und auch im Falle eines Wafers kein schwarzer Strahler ist. Bei Kenntnis der Emissivität dieses Gegenstandes kann nunmehr auf die Strahlung eines schwarzen Körpers zurückgerechnet werden.

Gemäß der vorliegenden Erfindung werden die Amplituden der modulierten Komponenten, die auch als Wechselstrom- bzw. Wechselspannungs (AC) -Komponenten bezeichnet werden, ins Verhältnis gesetzt, die vom für den Gegenstand vorgesehenen Strahlungsdetektor und vom für die Strahlungsquellen vorgesehenen Strahlungsdetektor gemessen werden. Die sich aus dem Amplitudenverhältnis ergebende Zahl ist in erster Näherung proportional zur Reflektivität des Gegenstandes, beispielsweise des Wafers. Diese Zahl wird nun zweimal für die weitere Auswertung benutzt. Erstens wird sie benutzt, um die von dem Gegenstand emittierte Strahlung, also die Wärmestrahlung des Gegenstandes von der am Gegenstand reflektierten Strahlung der Strahlungsquelle zu unterscheiden. Zweitens wird diese Zahl benutzt, um die vom Gegenstand emittierte Strahlung, also die Wärmestrahlung auf die Strahlung eines schwarzen Körpers der gleichen Temperatur zurück zu skalieren. Durch Einsetzen des dabei gewonnenen, zurückskalierten Temperaturwert in die invertierte Planck'sche Strahlungsformel ergibt sich dann eindeutig eine Temperatur. Da das genannte Amplitudenverhältnis der Modulationen bei der Aus-

wertung also zweimal verwendet wird, muß dieses möglichst genau gemessen werden, um bei der Auswertung und der Ermittlung der Temperatur des Gegenstandes genaue Werte zu erhalten. Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht eine
5 wesentlich genauere Bestimmung dieses Amplitudenverhältnisses, da die Modulationsparameter für jeden Heizzustand optimal vorgebar sind und sowohl die Modulation als auch deren Auswertung wesentlich vereinfacht wird.

10

15

20

25

30

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der erste Detektor ein Strahlungsdetektor, der auf einfache und zuverlässige Weise die von der Strahlungsquelle abgegebene Strahlung mißt. Dabei wird die von der Strahlungsquelle abgegebene Strahlung vor-
teilhafterweise über optische Leitungen oder Lichtkanäle zu dem Strahlungsdetektor geleitet. Um eine akkurate Mes-
sung zu gewährleisten, sind die Strahlungsquellen und die optischen Leitungen oder Lichtkanäle relativ zueinander
derart angeordnet, daß der erste Strahlungsdetektor ein Signal erzeugt, das frei von Einflüssen von Filamenthal-
tevorrichtungen oder anderen, den Strahlungsfluß oder die Strahlungstemperatur der Strahlungsquelle beeinträchti-
gender Mittel ist.

Gemäß einer anderen Ausführungsform der Erfindung kann der erste Detektor ein Temperatursensor, wie z. B. ein Thermoelement, sein, mit dem die Lampentemperatur und so-
mit die abgestrahlte Intensität ermittelbar ist.

Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung mißt der erste Detektor einen beliebigen mit der von der Strahlungsquelle abgegebenen Strahlung in Beziehung stehenden

- Parameter. So kann z. B. die Intensität über ein Impedanz-Meßvorrichtung, die die Impedanz (z. B. den Ohmschen Widerstand) eines Lampenfilaments mißt, ermittelt werden. Über eine geeignete Verarbeitungseinheit kann bei Kenntnis der Impedanz-Intensitäts-Relation der Strahlungsquelle, wie z. B. einer Heizlampe, deren abgestrahlte Intensität bzw. ein hierzu proportionaler Parameter ermittelt werden.
- 5
- 10 Die Erfindung wird nachstehend im Zusammenhang mit dem Beispiel einer Vorrichtung zum Aufheizen von Halbleiterwafern unter Bezugnahme auf die Figuren erläutert. Es zeigen:
- 15 Fig. 1 einen Längsschnitt durch eine Schnellheizanlage zur Behandlung von Halbleiterwafern in schematischer Darstellung,
 Fig. 2 einen Querschnitt entlang der in Fig. 1 eingezeichneten Schnittlinie II-II,
- 20 Fig. 3a und 3b schematische Diagramme zur Erläuterung des Modulationsgrads bzw. der Modulationstiefe unabhängig oder in Abhängigkeit von der Basisintensität der Strahlungsquelle und
 Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Blockschaltbilds zur Ansteuerung einer Strahlungsquelle bzw.
- 25 einer Lampe nach dem erfindungsgemäßen Verfahren.
- Die in Fig. 1 und 2 dargestellte Ausführungsform eines Schnellheizofens zur Behandlung von Halbleiterwafern 2 zeigt eine vorzugsweise aus Quarzglas bestehende Reaktionskammer 1 mit einem darin befindlichen Halbleiterwafer 2. Die Reaktionskammer 1 ist von einem Gehäuse 3 um-
- 30

geben, das jeweils oben und unten Lampen 4, 5 aufweist, deren Strahlung auf die Reaktionskammer 1 gerichtet sind.

Vorteilhafterweise besteht die Reaktionskammer 1 im wesentlichen aus einem für die Lampenstrahlung im wesentlichen transparenten Material, das auch hinsichtlich der Meßwellenlängen oder der Meßwellenlängenspektren der Pyrometer oder der verwendeten Strahlungsdetektoren transparent ist. Mit Quarzgläser und/oder Saphir, die einen über das Lampenspektrum gemittelten Absorptionskoeffizienten von etwa 0.1 1/cm bis 0.001 1/cm haben, lassen sich geeignete Reaktionskammern für Schnellheizsysteme aufbauen, bei denen die Dicke der Reaktionskammerwand zwischen 1mm und mehreren Zentimetern, beispielsweise 5 cm betragen kann. Je nach Reaktionskammerwanddicke kann die Materialauswahl hinsichtlich des Absorptionskoeffizienten erfolgen.

Kammerwanddicken im Zentimeterbereich sind insbesondere dann erforderlich, wenn in der Reaktionskammer 1 ein Unterdruck (bis hin zum Ultra-Hochvakuum) oder ein Überdruck erzeugt werden soll. Beträgt beispielsweise der Reaktionskammerdurchmesser etwa 300mm, so erhält man mit einer Quarzglasdicke von ca. 12mm bis 20mm eine hinreichende mechanische Stabilität der Kammer 1, so daß diese evakuiert werden kann. Die Reaktionskammerwanddicke wird entsprechend dem Wandmaterial, der Kammergröße und der Druckbelastungen dimensioniert.

Ein schematisch dargestelltes Pyrometer 6 (vgl. insbesondere Fig. 2) mit einem großen Eintrittswinkel mißt die vom Halbleiterwafer 2 emittierte Strahlung sowie die am Halbleiterwafer 2 reflektierte Strahlung der Lampen 5,

die im dargestellten Ausführungsbeispiel als Stablampen ausgebildet sind. Eine Anordnung dieser Art ist bekannt und beispielsweise in der DE 44 37 361 C oder der nicht vorveröffentlichten DE 197 37 802 A derselben Anmelderin
5 beschrieben, so daß zur Vermeidung von Wiederholungen darauf Bezug genommen wird, und diese Druckschriften insofern zum Inhalt der vorliegenden Beschreibung gemacht werden.

10 Als Stablampen werden bevorzugt Halogenlampen verwendet, deren Filament wenigstens teilweise eine Wendelstruktur aufweisen. Durch eine wenigstens teilweise Wendelstruktur läßt sich vorteilhaft ein bestimmtes vordefiniertes geometrisches und spektrales Abstrahlprofil der Lampe er-
15 reichen. Hierbei kann das Filament der Lampe z. B. abwechselnd gewendelte und ungewendelte Filamentabschnitte umfassen. Das Abstrahlprofil (sowohl das geometrische als auch das spektrale) ist in diesem Falle im wesentlichen durch den Abstand benachbarter gewendelter Filamentab-
20 schnitte bestimmt. Eine weitere Möglichkeit das Lampenabstrahlprofil zu definieren besteht z. B. darin, daß die Dichte der Filamentstruktur (z. B. der Wendeldichte) entlang des Filaments variiert wird.

25 Soll das Lampenprofil steuerbar sein, so lassen sich vorteilhaft Lampen, vorzugsweise Stablampen, mit mehreren einzeln steuerbaren Filamenten einsetzen. Lampen mit steuerbarem Lampenprofil sind insbesondere in Schnell-
30 heizanlagen zur Wärmebehandlung großflächiger Substrate, wie z. B. 300mm-Halbleiterwafer, vorteilhaft, da sich mit diesen Lampen und einer geeigneten Lampenansteuervorrichtung ein sehr homogenes Temperaturprofil entlang der Substratoberfläche erzielen läßt. Durch die Superposition

der Einzelabstrahlprofile der Filamente ergibt sich ein in weiten Bereichen einstellbares Gesamtabstrahlprofil der Lampe. Im einfachsten Falle umfaßt z. B. eine Halogenlampe zwei Filamente, z. B. jeweils mit Wendelstruktur oder wenigstens teilweise gewendelter Struktur, wobei die Wendeldichte und/oder der Abstand der gewendelten Filamentabschnitte des ersten Filaments vom ersten Ende zum zweiten Ende der Lampe zunimmt, und die Wendeldichte und/oder der Abstand der gewendelten Filamentabschnitte des zweiten Filaments entsprechend umgekehrt vom ersten zum zweiten Ende der Lampe abnimmt. Das Gesamtabstrahlprofil kann somit durch die Wahl der Stromstärke in den beiden Filamenten in weiten Bereichen variiert werden. Eine weitere Ausgestaltungsmöglichkeit einer Lampe mit steuerbarem Abstrahlprofil besteht darin, daß das Filament der Lampe wenigstens drei elektrische Anschlüsse umfaßt, wobei jeweils zwischen den Anschlüssen unterschiedliche Betriebsspannungen gelegt werden. Dadurch läßt sich abschnittsweise die Filamenttemperatur, und damit die Abstrahlcharakteristik der Lampe, entlang des Filaments steuern.

Alternativ zu den bisher beschriebenen Lampen lassen sich auch Plasma- oder Bogenlampen einsetzen, wobei auch hier das Abstrahlprofil einstellbar ist. So läßt sich beispielsweise das Lampenspektrum über die Stromdichte vom UV-Bereich bis hin zum nahen Infrarot einstellen. Die Bogenlampen haben hinsichtlich der aktiven Modulation den Vorteil, daß sie mit höherer Modulationsfrequenz betrieben werden können. Dadurch vereinfachen sich sowohl die Signalverarbeitungselektronik als auch die Auswerteverfahren.

Ein weiteres Pyrometer 7 erhält über optische Leitungen oder Lichtkanäle 8 das von den Lampen 5 abgestrahlte Licht direkt zugeleitet. Dabei sind die Strahlungsquellen und/oder die Lichtkanäle bevorzugt so angeordnet, daß das

5 Lampenpyrometersignal von einem Lampen- oder Filamentabschnitt resultiert, der frei von Filamenthaltevorrichtungen oder anderen, den Strahlungsfluß oder die Temperatur des durch die Lichtkanäle beobachteten Filament- oder

10 Lampenabschnitts beeinträchtigenden Mitteln ist. Um Wiederholungen hinsichtlich des Lampenpyrometers 7 und der Anordnung zum Bestrahlen des Lampenpyrometers 7 mit dem Licht der Lampen 5 zu vermeiden, wird auf die das gleiche Anmeldedatum aufweisende DE 197 54 385 derselben Anmelderin verwiesen, die insofern zum Inhalt der vorliegenden

15 Anmeldung gemacht wird.

Die Ausgangssignale der Pyrometer 6 und 7 werden einer nicht dargestellten Auswerteschaltung zugeführt, die die vom Halbleiterwafer 2 emittierte Strahlung dadurch er-

20 mittelt, daß sie die auf das Pyrometer 6 fallende Strahlung mit der vom Pyrometer 7 ermittelten Strahlung in Bezug setzt und dadurch die Strahlung ermittelt, die vom Halbleiterwafer 2 emittiert wird. Dies ist deshalb möglich, weil die von den Lampen 5 emittierte Strahlung aktiv und in einer definierten Weise moduliert ist. Diese

25 Modulation ist auch in der vom Wafer-Pyrometer 6 aufgenommenen Strahlung enthalten, so daß durch Vergleich oder in Beziehungsetzen der Modulationsgrade oder Modulationstiefen der von den Pyrometern 6 und 7 aufgenommenen

30 Strahlung eine Kompensation der vom Halbleiterwafer 2 reflektierten Lampenstrahlung in der vom Waferpyrometer 6 aufgefangenen Strahlung möglich ist, und dadurch die vom Halbleiterwafer 2 emittierte Strahlung und damit dessen

Temperatur, Reflektivität, Transmissivität und/oder Emissivität genau gemessen werden kann.

Ein weiteres, entsprechendes Lampenpyrometer, wie dies in
 5 Fig. 1 und 2 dargestellt und zuvor beschrieben ist, kann
 gemäß einer weiteren Ausführungsform auch mit entspre-
 chenden Lichtleitungen oder -schächten auf der anderen
 Seite des Gehäuses 3 zur Messung der Lampenstrahlung der
 oberen Lampen 4 vorgesehen sein. Das obere Lampenpyrome-
 10 ter entspricht dabei in seiner Funktion dem des unteren
 Lampenpyrometers 7, indem das obere Lampenpyrometer die
 Strahlung und deren Intensität bezüglich der oberen Lam-
 pen 4 mißt. Dabei ist es besonders vorteilhaft, wenn die
 Modulationsart oder der Modulationsgrad der Lampen der
 15 oberen Lampenbank unterschiedlich zum Modulationsgrad
 oder der Modulationsart der unteren Lampenbank ist. Durch
 Vergleich des vom Waferpyrometer 6 aufgenommenen Lichtes
 bzw. seiner Modulationsart oder seines Modulationsgrads
 mit der Modulationsart bzw. dem Modulationsgrad der mit
 20 dem oberen Lampen-Pyrometer ermittelten Intensität in ei-
 ner nicht dargestellten Auswerteeinheit ist es darüber
 hinaus möglich, auch die Transmissivität des Halbleiter-
 wafers 2 zu ermitteln und daraus Rückschlüsse auf die
 Temperatur, die Emissivität und/oder die Reflektivität
 25 des Wafers 2 zu ziehen.

In den Fig. 3a und 3b sind jeweils die Intensitäten I der
 Strahlungsquellen über der Zeit aufgetragen. Wie Fig. 3a
 zeigt, ist der Modulationsgrad bzw. die Modulationstiefe
 30 im wesentlichen konstant und unabhängig von der von der
 Strahlungsquelle abgegebenen Strahlungsintensität, wäh-
 rend bei dem in Fig. 3b dargestellten Ausführungsbeispiel
 der Modulationsgrad oder die Modulationstiefe von der ab-

gestrahlten Intensität der Strahlungsquelle bzw. der Größe ihres Ansteuersignals abhängt bzw. zu ihr proportional dazu ist.

- 5 Die sogenannte Absolut-Modulation gemäß Fig. 3a weist den Vorteil auf, daß während des Hochheizens des Halbleiterwafers 2 bzw. der Reaktionskammer 1 die Heizleistung durch die Modulation praktisch nicht beeinträchtigt wird, und daher die gesamte Intensität für die schnelle Auf-
- 10 heizung zur Verfügung steht. Dagegen weist die sogenannte Relativ-Modulation gemäß Fig. 3b den Vorteil auf, den Modulationsgrad bzw. die Modulationstiefe um so stärker vorliegen zu haben, je höher die Abstrahlleistung der Strahlungsquellen ist. Ein Steuern oder aktives Regeln
- 15 der Modulationstiefe ist ebenfalls möglich.

In Fig. 4 ist eine schematische Schaltungsanordnung zur Ansteuerung einer Strahlungsquelle oder Lampen 11 zur Erzeugung einer Strahlung bzw. eines Strahlungsverlaufs für

20 eine bestimmte Wafertemperatur bzw. eines bestimmten Temperaturverlaufs dargestellt, mit der der Wafer 2 aufgeheizt bzw. durch entsprechendes Abschalten oder Verrin- gern der Intensität der Lampen abgekühlt werden soll.

- 25 In einem Komparator 11 wird die mit dem Waferpyrometer 6 indirekt gemessene Wafertemperatur (Anschluß 13) jeweils mit einer Soll-Temperatur 14 verglichen und das Vergleichssignal einem Regler 15 zugeführt, an dessen Ausgang das Ansteuersignal entsprechend der Einstellelemente
- 30 16, 17 auf die beiden Lampen bzw. Lampenbänke aufgeteilt wird. Danach wird das Ansteuersignal durch Aufteiler 18, 19 auf die einzelnen Lampen 4, 5 der Lampenbänke aufgeteilt, wobei der Übersichtlichkeit halber lediglich je-

weils ein Aufteiler 18, 19 konkret dargestellt ist, der das Ansteuersignal an die Lampe 4 bzw. 5 abgibt.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn das Ansteuersignal unmittelbar vor der Lampe 4 bzw. 5 moduliert ist, da auf diese Weise Verzerrungen vermieden werden können, die durch die Lampenansteuerschaltung hervorgerufen werden könnten. In diesem Falle erfolgt die Modulation also am Schaltungspunkt 20 bzw. 21 durch nicht dargestellte Modulationseinrichtungen, beispielsweise durch programmierbare Kurven-, Amplituden- und/oder Frequenzverläufe.

Die Modulation kann jedoch auch an anderen Stellen innerhalb der Ansteuerschaltung gemäß Fig. 4, beispielsweise am Schaltungspunkt 22 oder am Schaltungspunkt 20 vor oder nach dem Regler 23 vorgenommen werden. In diesem Falle ist jedoch eine individuelle Modulation der Ansteuersignale für jeweils eine Lampe nicht möglich, da die Modulation des gemeinsamen Ausgangssignals einheitlich erfolgt.

20

Die Modulation ist mittels eines entsprechenden Datenverarbeitungsprogramms auf einfache Weise durchführbar.

Durch Software-Tabellen lassen sich praktisch sämtliche Kurvenformen und Frequenzen frei programmieren, wobei die Länge der Tabelle die Frequenz bestimmt, da die Tabelle mit einer festen Zeitbasis (zum Beispiel 1 ms) abarbeitbar ist und nach Erreichen des Tabellenendes beliebig oft wiederholt werden kann. Die Tabelle kann zum Beispiel mit einer Basis von $2^8 = 256$ angelegt sein, wobei der Algorithmus für die Modulation beispielsweise lautet:

30

$$C_{\text{mod}} = C_{\text{DC}} \cdot \frac{T(n)}{2^{\text{Basis}}}$$

Dabei ist C_{mod} der Modulationsgrad, der C_{DC} der Wert der nicht modulierten bzw. Grund-Intensität oder -Amplitude und $T(n)$ sind die jeweiligen diskreten Tabellenwerte.

5

Auf diese Weise können beliebige Modulationsgrade oder -tiefen, Kurvenformen und Frequenzen auf einfache Weise programmiert werden.

10 Mit beispielsweise einer 100%igen Modulation bei 125 Hz ergeben sich die diskreten Tabellenwerte mit

256, 435, 512, 435, 256, 76, 0, 76.

15 Der Durchschnittswert der Tabellenwerte muß dabei dem Divisor entsprechen, damit die resultierende integrierte Leistung unverändert bleibt.

Bei 10%iger Modulation mit 125 Hz ergeben sich die Tabellenwerte zu

20

256, 274, 282, 274, 256, 238, 230, 238.

25 Die Auflösung, d. h. die Zahl der Tabellenwerte pro Zeiteinheit ist dadurch veränderbar, daß eine andere Basis genommen wird.

30 Dieses Ansteuer- bzw. Modulationsverfahren weist den Vorteil auf, daß nur Verschiebe- und Multiplikationsbefehle erforderlich sind, wenn der Divisor eine Zahl mit der Basis 2 ist.

Die Erfindung wurde zuvor anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele erläutert. Dem Fachmann sind jedoch Ausgestaltungen und Abwandlungen möglich, ohne daß dadurch der Erfindungsgedanke verlassen wird. Das erfindungsgemäße Verfahren ist insbesondere auch im Zusammenhang mit anderen Vorrichtungen oder Meßverfahren als dem zuvor beschriebenen mit Vorteil einsetzbar, um mit einfachen Mitteln zuverlässige, reproduzierbare Meßergebnisse zu erhalten und daraus die Temperatur, die Transmissivität, die Emissivität und/oder die Reflektivität von Gegenständen mit hoher Genauigkeit zu ermitteln. Das erfindungsgemäße Verfahren ist auch mit anderen Detektoren als dem dargestellten und beschriebenen Lampenpyrometer einsetzbar. So kann z. B. statt des Lampenpyrometers ein Temperatursensor, wie z. B. ein Thermoelement verwendet werden, um die von den Lampen emittierte Strahlung zu ermitteln. Ferner ist es möglich, die von den Lampen emittierte Strahlung mittels einer Impedanzmessung des Lampenfilaments und nachfolgende Verarbeitung des gemessenen Werts zu ermitteln. Anhand einer Impedanz-Intensitäts-Relation der Lampe kann auf die von der Lampe abgestrahlte Intensität zurückgeschlossen werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen elektromagnetischer Strahlung,
die von einer Oberfläche eines Gegenstandes abge-
strahlt wird, der durch elektromagnetische, von we-
nigstens einer Strahlungsquelle abgegebenen elektro-
magnetischen Strahlung bestrahlt wird, wobei die von
der Strahlungsquelle abgegebene Strahlung mit wenig-
stens einem ersten Strahlungsdetektor und die vom
bestrahlten Gegenstand abgegebene Strahlung mit we-
nigstens einem zweiten, die Strahlungsdetektor mes-
senden Detektor ermittelt wird,
dadurch gekennzeichnet, daß die
von wenigstens einer Strahlungsquelle abgegebene
Strahlung mit wenigstens einem charakteristischen
Parameter aktiv moduliert wird, und daß die vom
zweiten Strahlungsdetektor ermittelte Strahlung
zur Kompensation der vom Gegenstand reflektierten
Strahlung der Strahlungsquelle durch die vom ersten
Strahlungsdetektor ermittelte Strahlung korrigiert
wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
daß die aktive Modulation der von der Strahlungs-
quelle abgegebenen Strahlung zu deren Charakteri-
sierung bei der Korrektur der vom zweiten Strah-
lungsdetektor ermittelten Strahlung herangezogen
wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekenn-
zeichnet, daß die von wenigstens einer Strahlungs-
quelle abgegebene Strahlung amplituden-, frequenz-
und/oder phasenmoduliert ist.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Signalform bei einer Amplitudenmodulation einen stetigen Signalverlauf aufweist.
- 5
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlungsquelle aus mehreren Lampen besteht.
- 10
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Lampen ihre Strahlung von wenigstens einem Filament mit wenigstens teilweise gewendelter Filamentstruktur emittieren.
- 15
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Filamentstruktur der Lampe ein vordefiniertes geometrisches und spektrales Abstrahlprofil erzielbar ist.
- 20
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Lampenstrahlung von Filamentabschnitten mit abwechselnder gewendelter und ungewendelter Filamentstruktur emittiert wird.
- 25
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Lampenstrahlung von zwei einzeln steuerbaren Filamenten emittiert wird.
- 30
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Lampenstrahlung von einem Filament mit wenigstens drei elektrischen Anschlüssen emittiert wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte der Filamentstruktur entlang des Filaments variiert.
- 5
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlung von einer Halogenlampe emittiert wird.
- 10
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens ein Teil der Strahlung von Bogenlampen emittiert wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens eine der Lampen in ihrer Strahlung moduliert ist.
- 15
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß alle Lampen dieselbe Strahlungsmodulation aufweisen.
- 20
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Lampen unterschiedliche Strahlungsmodulationen aufweisen.
- 25
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlungsmodulation für wenigstens einige der Lampen zeitlich synchron erfolgt.
- 30
18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulationsgrad oder die Modulationstiefe der von der Strahlungsquelle

abgegebenen Strahlung von der abgestrahlten Lampenintensität unabhängig ist.

- 5 19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulationsgrad oder die Modulationstiefe von der abgestrahlten Lampenintensität abhängig ist.
- 10 20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulationsgrad oder die Modulationstiefe gesteuert wird.
- 15 21. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Lampenintensität pulsweiten-moduliert ist.
- 20 22. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlung durch Verwendung von Tabellenwerten mit einem Datenverarbeitungsprogramm moduliert wird.
- 25 23. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlung durch Ändern der Zählerfrequenz von Generatoren für die Pulsweiten-Modulation moduliert wird.
- 30 24. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die von der Strahlungsquelle abgegebene Strahlung durch eine Modulation der Ansteuersignale für die Strahlungsquelle(n) moduliert wird.

25. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Verwendung zur Bestimmung der Temperatur, Reflektivität, Transmissivität und/oder Emissivität eines Gegenstands.
- 5
26. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Verwendung im Zusammenhang mit dem thermischen Behandeln von Halbleitersubstraten.
- 10
27. Verfahren nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß die thermische Behandlung der Halbleitersubstrate innerhalb einer Reaktionskammer erfolgt, die im wesentlichen aus einem, für die elektromagnetische Strahlung der Strahlungsquellen und für das Spektrum der Meßwellenlängen der ~~Strahlungs~~ Detektoren transparenten Material besteht.
- 15
28. Verfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß das transparente Material Quarzglas und/oder Saphir umfaßt.
- 20
29. Verfahren nach Anspruch 27 oder 28, dadurch gekennzeichnet, daß das Material einen über das Lampenspektrum gemittelten Absorptionskoeffizienten zwischen 0.001 1/cm und 0.1 1/cm aufweist.
- 25
30. Verfahren nach Anspruch 27 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlung der Strahlungsquelle eine Wanddicke der Reaktionskammer zwischen 1mm und 5cm durchstahlt.
- 30

31. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Detektor ein Strahlungsdetektor ist.

5 ~~31_32.~~ Verfahren nach einem ~~der vorhergehenden Ansprüche~~
 ~~ehe Anspruch 31~~, dadurch gekennzeichnet, daß der erste
 ~~Strahlungsd~~ Detektor die von der Strahlungsquelle
 abgegebene Strahlung über optische Leitungen oder
 Lichtkanäle empfängt.

10

~~32_33.~~ Verfahren nach Anspruch ~~31_32~~, dadurch gekennzeichnet,
 daß durch eine Anordnung der Strahlungsquellen
 und der optischen Leitungen oder der Lichtkanäle
 relativ zueinander der erste Strahlungsdetektor
 ein Signal generiert, das frei von Einflüssen
 von Filamenthaltevorrichtungen oder anderer, den
 Strahlungsfluß oder die Strahlungstemperatur der
 Strahlungsquelle beeinträchtigender Mittel ist.

15

20 34. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 31, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Detektor ein Temperatursensor ist.

25

35. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 30, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Detektor einen mit der abgestrahlten Strahlung der Strahlungsquellen in Beziehung stehenden Parameter mißt.

30

36. Verfahren nach Anspruch 35, dadurch gekennzeichnet, daß der Detektor die Impedanz der Strahlungsquellen mißt.

- ~~33~~37. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der charakteristische Parameter periodisch moduliert wird.
- 5 ~~34~~38. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 32, dadurch gekennzeichnet, daß der charakteristische Parameter nichtperiodisch moduliert wird.

Zusammenfassung

Bei einem Verfahren zum Messen elektromagnetischer Strahlung, die von einer Oberfläche eines Gegenstandes abgestrahlt wird, der durch elektromagnetische, von wenigstens einer Strahlungsquelle abgegebenen elektromagnetischen Strahlung bestrahlt wird, wobei die von der Strahlungsquelle abgegebene Strahlung mit wenigstens einem ersten ~~Strahlungs~~ Detektor und die vom bestrahlten Gegenstand abgegebene Strahlung mit wenigstens einem zweiten, die Strahlungsdetektor messenden Detektor ermittelt wird, ergeben sich besonders zuverlässige Meßergebnisse auf einfache Weise dadurch, daß die von wenigstens einer Strahlungsquelle abgegebene Strahlung mit wenigstens einem charakteristischen Parameter aktiv demoduliert wird, und daß die vom zweiten ~~Strahlungs~~ Detektor ermittelte Strahlung zur Kompensation der vom Gegenstand reflektierten Strahlung der Strahlungsquelle durch die vom ersten ~~Strahlungs~~ Detektor ermittelte Strahlung korrigiert wird.

(Fig. 1)